

軌道変状リスクを低減した 新しい線路下横断工法

中山 泰成¹・高橋 保裕¹・齋藤 貴²・本田 諭²・尾関 聡司³

¹正会員 東日本旅客鉄道(株) 上信越工事事務所 高崎工事区 (〒370-0052 群馬県高崎市旭町138-5)
E-mail: taisai-nakayama@jreast.co.jp

²正会員 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター (〒151-8587 東京都渋谷区代々木2-2-2)
E-mail: tk-saito@jreast.co.jp

³非会員 鉄建・鹿島・佐藤JV JV二ツ家作業所 (〒364-0022 埼玉県北本市下石戸上字東原1975-10)
E-mail: satoshi-ozeki@tekken.co.jp

JR東日本では、線路下横断構造物を施工する際、地盤隆起や沈下に伴う軌道変状が列車運行に影響を及ぼすことを懸念し、線路直下は列車運行時間外の施工を基本としてきた。しかし、施工が夜間の短時間に限られるため、工期、工費が増大することが課題であった。

そこで、施工時に生じる地盤変状を抑制し、列車運行時間帯にも線路下横断構造物を施工可能とする非開削工法として、「地盤切削JES工法」の開発を行ってきた。これは、従来のHEP&JES工法をベースとして、刃口前面上部に取り付け地盤切削ワイヤーで地中の支障物を切断することにより軌道変状リスクを低減するものである。今回、営業線路の直下で初の昼夜施工を行ったので、これを報告する。

Key Words : JES method , Non-open construction , wire saw , construction of under the railroad

1. はじめに

近年、道路等との平面交差の解消を目的として、既設の鉄道直下を横断する地下構造物（以下、「線路下横断構造物」という）を新設する工事が増加している。JR東日本では、土被りが小さい箇所では線路下横断構造物を施工する際、地盤隆起や沈下に伴う軌道変状によって列車運行に影響を及ぼすリスクを想定し、線路直下は列車運行時間外（以下、「線路閉鎖作業」という）の施工を基本としてきた。しかしながら、作業可能な時間が夜間の短時間に限られるため、工期、工費が増大することが課題であった。

このような状況を踏まえ、施工時に生じる地盤変状を抑制し、列車運行時間帯にも線路下横断構造物を施工可能とする非開削工法として、「地盤切削JES工法」の開発を行ってきた^{1), 2), 3)}

本工法を、2012年9月から12月にかけて、高崎線桶川・北本間二ツ家道橋新設工事におけるボックスカルバート上床版の掘進に適用し、初めて列車運行時間帯（昼夜）に施工した。本稿では、地盤切削JES工法の概要及び施工計画、施工結果について報告する。

2. 地盤切削JES工法の概要

(1) 地盤切削JES工法開発の経緯

JR東日本では、線路下横断構造物の施工法として、非開削工法のHEP&JES工法（以下、「従来工法」という。）を多く採用してきた。これは非開削で鋼製のエレメントをけん引し、エレメント同士を特殊な継手で嵌合させる事で、本体構造物を構築する工法である（図-1）。従来工法では、地山に圧入させるエレメントの刃口内部のオーガーにより地盤を掘削する機械掘削が一般的である。しかしながら、対象地盤が礫層や玉石混じり層の場合や、施工基面以下に構造物基礎やコンクリート塊等の支障物が残置されている場合、刃口で支障物を押し込む

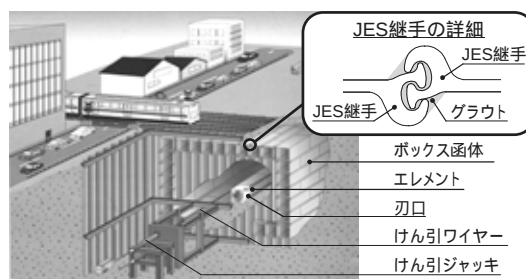


図-1 HEP&JES工法概要図

ことによる地盤隆起，支障物除去後の空隙部の充填不良に伴う陥没，沈下といった地盤変状リスクが想定されていた．これらの課題を解決するため，従来工法をベースとして，刃口前面上部に地盤切削ワイヤーを組み込んだ「地盤切削JES工法」を開発した．本工法は，刃口前面上部に取り付けた地盤切削ワイヤーにより，支障物を含む地山を切削しながら掘進するものである（図-2）．

以下に，地盤切削JES工法の特徴を示す．

(2) エレメント及び刃口の形状

先行して本工法を採用した現場において，掘進中に刃口が自重により低下傾向を示すことが課題となったことから⁴⁾，刃口に底面テーパ（勾配）を設けた．これにより，けん引時に刃口が地山に乗り上がろうとすることで，上向きの力を得られるようにしている．なお底面テーパ形状は，最初に掘進する基準エレメントは全面にわたって30mm，標準エレメントは低下傾向を示しやすい貫通済エレメントと継手が嵌合しない地山側に50mmのテーパを設けている（図-3）．

(3) 地盤切削装置

地盤切削装置は，刃口内部に設置したモーターで地盤切削ワイヤーを回転させる機構となっている（図-4）．地盤切削ワイヤーには，無水エンドレスワイヤー（φ

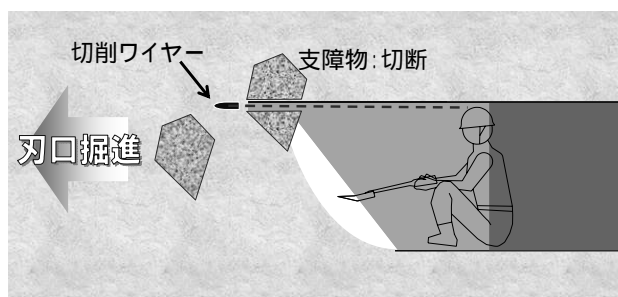


図-2 地盤切削 JES 工法のイメージ

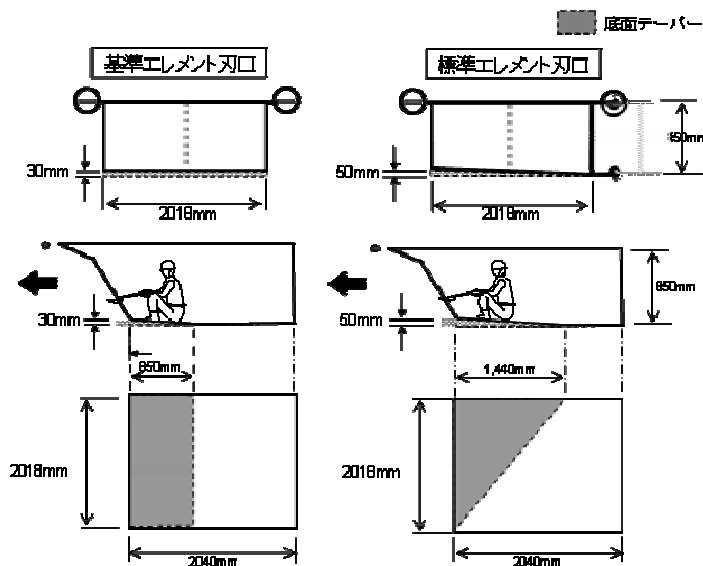


図-3 刃口底面のテーパ

11mm) を使用しており，切削時に水を使用しないことから地盤の緩みを生じるリスクが小さい．なお，掘進の途中で地盤切削装置の交換が必要となった場合，刃口内部から交換可能な仕様としている．

(4) 水平ボーリング

本工法では，地盤切削装置のうち，プーリー及び地盤切削装置監視用CCDカメラが通過する空間を確保するため，事前に水平ボーリングを実施してガイドパイプ（φ300mm）を設置する必要がある（図-5）．刃口がローリングした際，刃口とガイドパイプが局部的に競ってガイドパイプを押し抜くことのないよう，ガイドパイプ底部に防護レールを設置している．これは刃口がローリングした際，防護レールによりガイドパイプに及ぶ荷重を広範に分担させるためのものである．エレメント掘進時，ガイドパイプは地盤切削装置により切断され，下半分は刃口内部に取り込んで回収する．なお，ガイドパイプの上半分は地山内に存置されるため，エレメントとの空洞部分にはモルタル等を充填する．

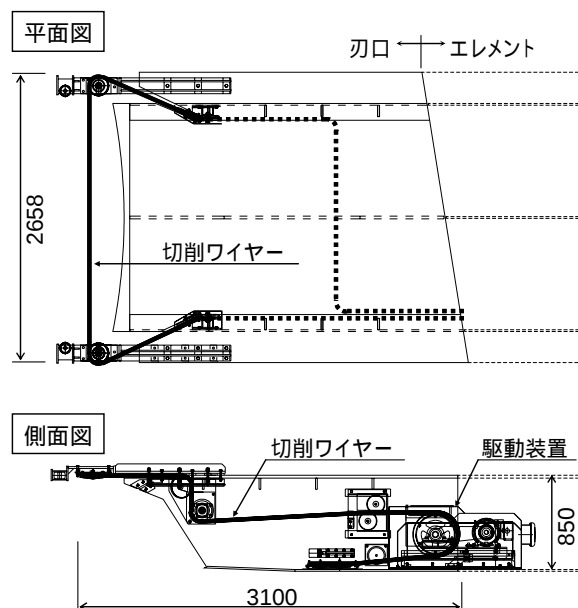


図-4 地盤切削装置の配置状況

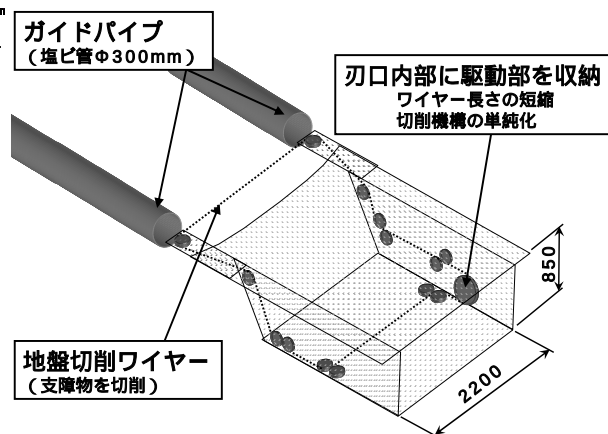


図-5 水平ボーリングの施工位置

(5) 円弧すべり及び滑動対策

切羽の崩壊に伴う軌道の高低変位を防ぐため、刃口前面の三次元円弧すべりの検討を行い、従来工法の人力掘進用の刃口よりも刃口ルーフを延長した（図-6）。また、軌道の通り変位に対しては、従来工法と同じく刃口上部の土塊の滑動について検討を行い、必要に応じて摩擦低減対策を行う。

(6) 掘進作業方法

エレメントけん引及び地盤切削装置の操作は、作業ヤード内に設置した中央管理室にて行う。中央管理室では、刃口に設置した CCD カメラで切羽及び切削装置の状態を確認できるほか、有線通話装置にて刃口内部にいる作業員と連絡可能である。

刃口内部には2～3名の作業員が入って掘削作業を行う。

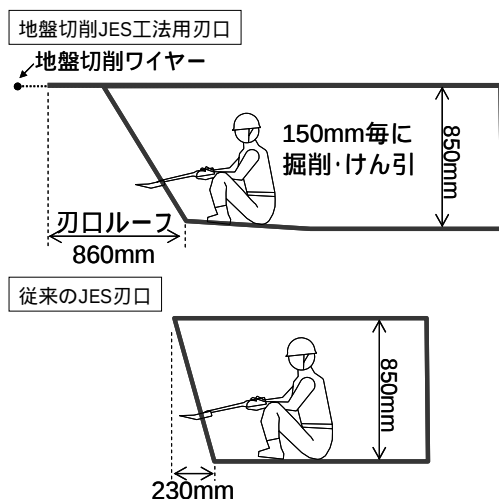


図-6 刃口形状の比較

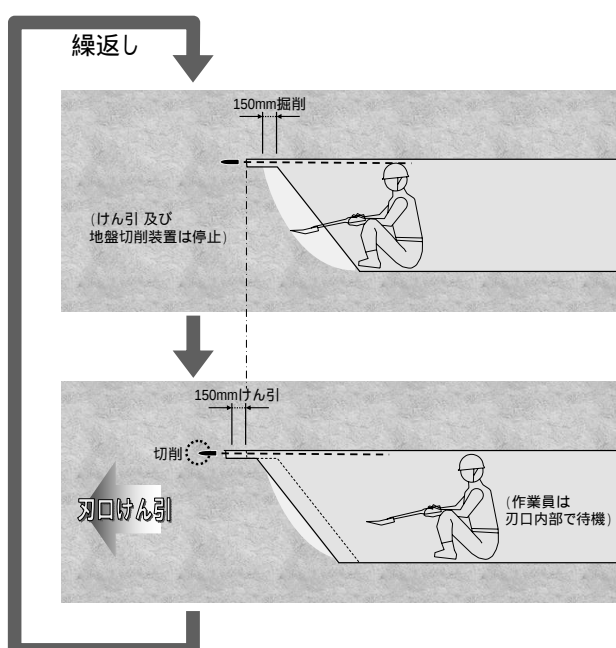


図-7 掘進作業のイメージ

円弧すべりの検討結果から刃口ルーフを860mmとしているが、掘削範囲は150mm前方までとし、刃口ルーフ内側に掘削可能範囲を視覚的に確認できる塗色を施している。エレメント掘進は、地盤切削装置及びけん引を停止した状態で150mm人力掘削を行い、掘削完了後に作業員が刃口に入った状態で地盤切削装置を移動して150mmけん引する、という作業を繰り返しながら進めていく（図-7）。なお、刃口先端部の切削ワイヤーは掘削箇所より前方の地山に位置し、刃口内部のワイヤー取り回し箇所についても鉄板防護しているため、ワイヤーが破断しても作業員が受傷しない安全に配慮した設計としている。

(7) 姿勢制御及び掘削管理

刃口の姿勢計測においては、刃口高さ、ローリング（刃口左右の高低差）、ピッチング（刃口前後の高低差）について測定することとした（図-8）。それぞれの計測装置は以下のとおりである。

- ・ローテーティングレーザー：刃口高さ
- ・水準計：ローリング、ピッチング

また、日々の施工開始前及び終了時にレベルによる測量を実施し、刃口姿勢を確認することとした。

掘進時の姿勢管理は、刃口の底面テーパーにかかる土砂の量を変更することで、地山に乗り上げようとする力を調整して姿勢を制御する（図-9）。

刃口を上向きにしたい場合は調整部の土砂を突き崩したり残したままとして底面テーパーを乗り上げさせ、下向きにしたい場合はすき取ることで底面テーパーにかかる土砂の量を少なくする。

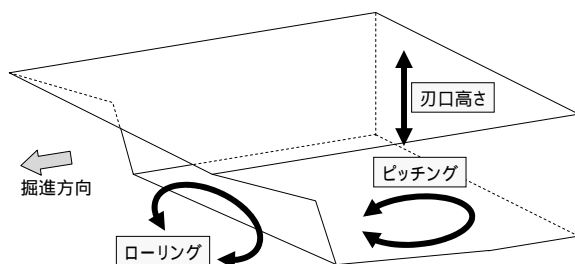


図-8 刃口の姿勢計測内容

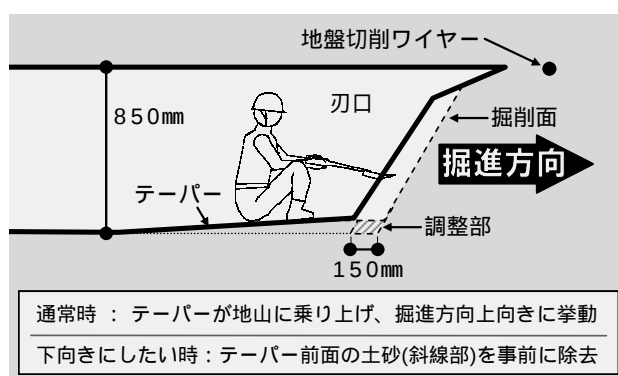


図-9 掘削パターンによる刃口の姿勢制御

突き崩したりすき取る土砂の量（以下、「掘削パターン」という）は、基準エレメントで0mm～25mm、標準エレメントで0mm～40mmの間で設定した（図-10）。

3. 現場概要

今回、地盤切削JES工法を適用した高崎線桶川・北本間二ツ家ご道橋新設工事は、JR高崎線と一般国道468号線首都圏中央連絡自動車道（以下、「圏央道」という）及び、主要地方道東松山桶川線（以下、「県道」という）の立体交差工事である（図-11）。

事業主体である国土交通省は、建設中の圏央道の早期開通を目指しており、当社受託区間についても工期短縮を求められることとなった。そのため、当初は線路閉鎖作業で計画していた上床版エレメントの施工について、地盤切削JES工法を採用することにより、列車運行時間帯の昼夜施工とすることで工期短縮を図ることとなった。

新設する構造物は延長35.1m、幅49.0m、高さ8.9m、一層4径間のボックスカルバートであり、中央部の2径間が圏央道、両端部の2径間が県道（歩道含む）である。函体延長35.4mのうち線路直下の16.7mはJESエレメントに

よる函体、その両側はRC函体である。JESエレメント函体は、到達側から発進側に向けて、0.3%の片勾配となっており、最小土被りは1.4mである（図-12、図-13）。

本工事では工期短縮のため、最初に施工する基準エレメントを2本として、最大4班体制での施工を可能としている。上床版エレメントが併合する箇所には、施工誤差を吸収するための調整エレメントを配置している。

当該地域の地質条件は、上床版エレメント施工範囲（GL-1.4m～-2.3m）ではローム層（N値2～5程度）、側壁及び下床版エレメント施工範囲では粘土、シルト及び細砂の互層（N値0～15程度）である。なお、地下水位は、GL-4.0m程度であり、上床版エレメントより下方に位置している。

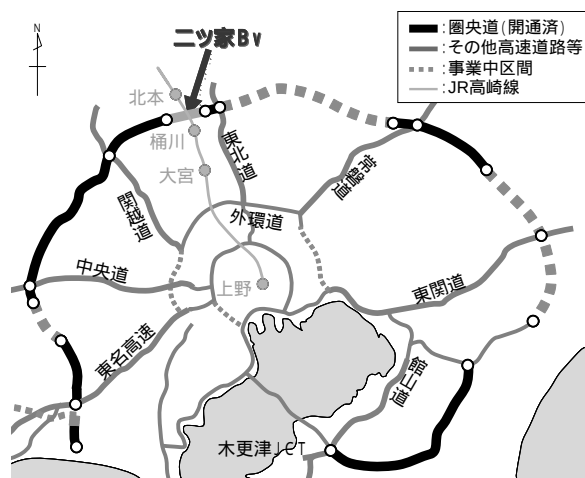


図-11 施工現場位置

エレメント計画高に対する刃口の計測高さの差	刃口傾位修正力の強さと向き	刃口レベル	掘削パターン（標準エレメント）	掘削パターン（基準エレメント）
6mm h > 3mm	6mm	1 高位	A: 40mmすき取り 40mm 20mm	A: 25mmすき取り 25mm 25mm
3mm h > 0mm	3mm	2 高位	B: 30mmすき取り 30mm 15mm	B: 20mmすき取り 20mm 20mm
0mm h > -2mm	0mm	3 標準高	C: 20mmすき取り 20mm 10mm	C: 15mmすき取り 15mm 15mm
-2mm h > -4mm	-2mm	4 低位	D: 10mmすき取り 10mm 5mm	D: 10mmすき取り 10mm 10mm
-4mm h > -6mm	-4mm	5 低位	E: 50mm突き崩し 50mm 25mm	E: 30mm突き崩し 30mm 30mm
-6mm h > -8mm	-6mm	6 低位	F: 25mm突き崩し 25mm 12.5mm	F: 15mm突き崩し 15mm 15mm
-8mm h > -10mm	-8mm	7 低位	G: 断面通り	G: 5mmすき取り 5mm 5mm

-10mm h の場合、ワイヤーによる刃口引き上げを検討すること。

図-10 設定した掘削パターン

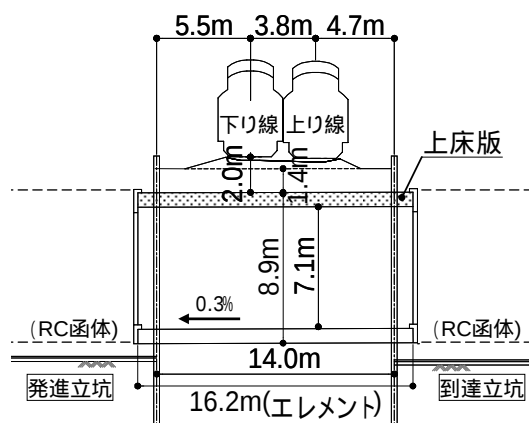


図-12 函体縦断面図

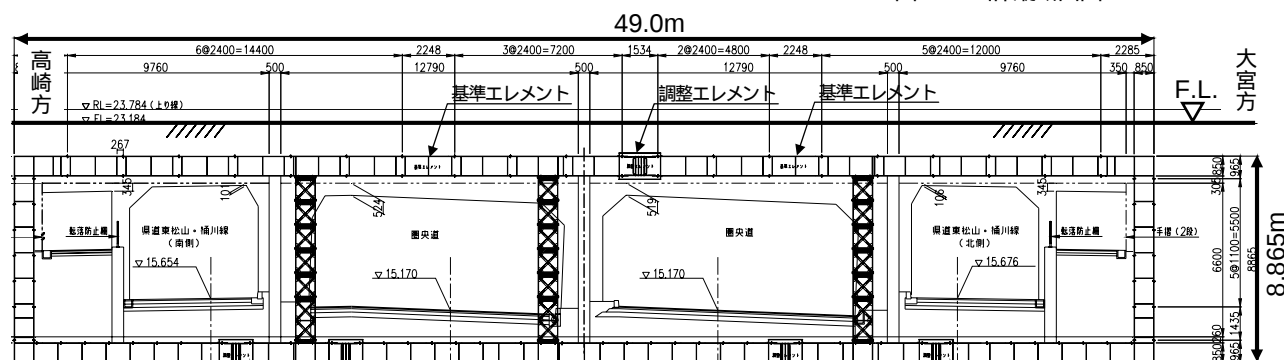


図-13 函体横断面図（A-A断面）

4. 施工計画の検討

(1) 軌道監視について

営業線路直下での施工となるため、施工期間中はリンク式軌道計測器及び水準計を現場に設置し、軌道変位を3分に1回以内の頻度で計測した。なお、県道と交差している二ツ家踏切部については、リンク型変位計及び水準計を設置できないことから、軌道スコープにより舗装板両端の挙動を光学的に計測している。

軌道変位量の管理値については、徐行や運転中止が必要となる運転規制値に対して2～3mmの余裕を持たせて限界値を設定し、限界値の0.4倍を警戒値、0.7倍を工事中止値とした⁵⁾(表-1)。

また、現場区間の軌道構造はバラスト軌道であり、万一、道床陥没が発生した場合の軌道変位抑制対策として、簡易工事術を設置した。

(2) 昼夜施工への移行ステップ

今回、初めて列車運行時間帯での掘進となることから、当該現場で軌道への影響がないことを検証するため、以下のステップを踏んで施工を行うこととした(図-14、図-15)。なお、調整エレメントについては従来工法と同様の掘進となるため、線路閉鎖作業としている。

【ステップ1】

(A1, A2 : 計2エレメント)

軌道影響範囲内()を線路閉鎖間合で施工し、軌道影響範囲外を夜間作業で掘進する。

【ステップ2】

(B1, BB1, BB3, C3 : 計4エレメント)

下り線の軌道影響範囲内()を23:40からの夜間作業(下り通過列車8本)、上り線の軌道影響範囲内()を21:00からの夜間作業(上り通過列車13本)で掘進する。軌道影響範囲外()については夜間作業で掘進する。

【ステップ3】

(上記及び調整エレメントを除く上床版エレメント : 14エレメント)

全ての範囲について昼夜作業(昼間作業班と夜間作業班の2方体制)で掘進する。

各ステップの移行判断基準については、上床版エレメントの掘進に伴う軌道変位の進行量が、前述の管理値のうち警戒値相当(高低, 通り8mm, 水準, 平面性7mm)以下であることとした。

また、移行判断基準を満たさない場合には、次に施工するエレメントについて再度同じステップの条件で掘進することとした。

(3) 地盤切削装置の交換

刃口の先端に取り付けている地盤切削ワイヤーが破断した場合及びブーリーが磨耗交換基準に達した場合には、掘進の途中で交換作業が必要となる。この場合、刃口ローフより先行して掘削する必要が生じることから、刃口先端が軌道影響範囲内である場合には、当該線の線路閉鎖作業にて交換することとした。

表-1 軌道の管理値

	高低	通り	水準	平面性
警戒値	8mm	8mm	7mm	7mm
工事中止値	15mm	15mm	12mm	12mm
限界値	22mm	22mm	18mm	18mm
運転規制値及び規制内容	24mm 45km/h 以下徐行	24mm 45km/h 以下徐行	21mm 運転中止	21mm 運転中止
運転規制値までの余裕	2mm	2mm	3mm	3mm

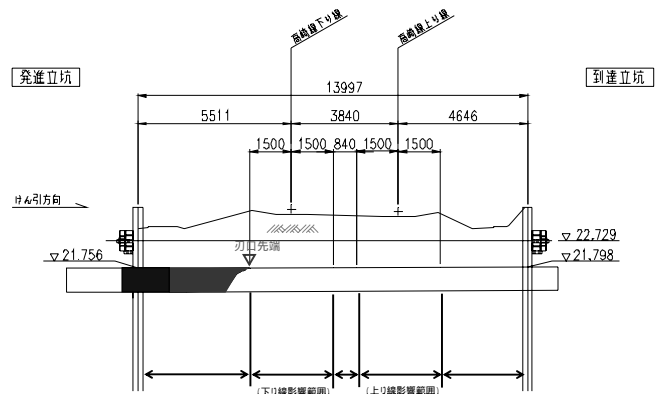


図-14 掘進時の軌道影響範囲

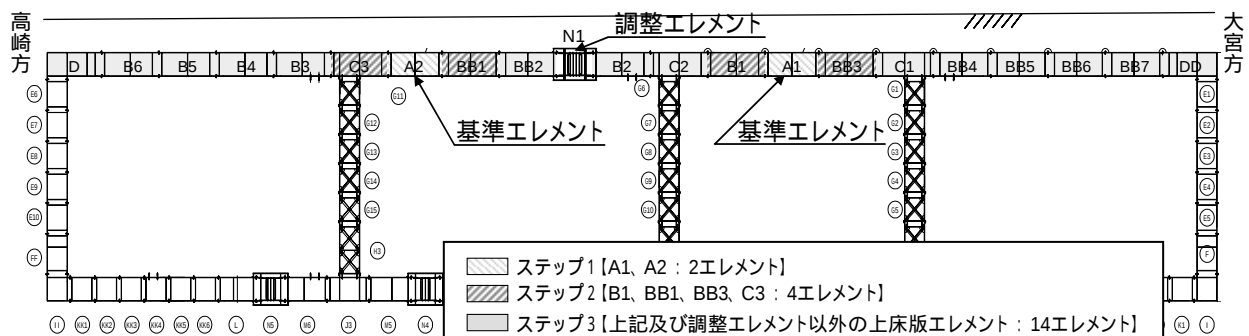


図-15 各エレメントの施工条件

交換作業に要する時間については事前の試験施工等を踏まえ、所定の間合いで完了するようサイクルタイムを検討した。また、線路閉鎖間合いのうちに交換作業が完了しない場合には、作業を一旦中断して先行部分を土のうで埋め戻し、翌日の線路閉鎖作業にて交換作業を再開することとした。

なお、本工事においては、掘進途中での交換作業が発生するリスクを低減するため、1エレメントが貫通する都度、地盤切削ワイヤー及び先端プーリーを交換することとした。

5. 施工結果

(1) 施工実績

2012年9月下旬より上床版エレメントの掘進を開始した。作業は最大で4班体制（昼夜8班体制）で実施した（図-16）、大きなトラブルもなく、予定通り2012年12月下旬に上床版エレメントの掘進を全て完了した。

1時間あたりの掘進距離は0.27m～0.39mで、作業条件別の掘進日数はステップ1及びステップ2で13～17日、ステップ3で4～7日であった（表-2）。日数にはエレメント接続や切削装置交換等の作業を含めているため作業状況による変動はあるが、昼夜施工（ステップ3）では線路閉鎖作業（ステップ1）及び夜間作業（ステップ2）と比較して約1/2～1/3の期間で掘進を完了している。

(2) 刃口姿勢制御実績

施工では、発進立坑において刃口を設計高さより30mm 高く据えて発進させ、到達立坑へ向けて上り0.3%の勾配で掘進している。施工精度の目標値は、 $L/500=28\text{mm}$ （L：けん引距離14m）であるが、概ね目標



図-16 上床版エレメント掘進時の発進立坑の状況

表-2 エレメント掘進距離及び日数

	線路閉鎖施工 〔ステップ1〕	夜間施工 〔ステップ2〕	昼夜施工 〔ステップ3〕
1日あたり掘進距離	0.9～1.2m	0.9～1.5m	2.0～4.0m 2方合計
1日平均掘進距離	1.0m	1.0m	2.4m
貫通までの平均作業日数	14日	13～17日	4～7日

貫通までの日数には、後続のエレメント接続や切削装置の交換等を含む

値以内で施工できており、刃口下面のテーパー及び掘削パターンにより刃口の高さ管理が可能であることが確認できた（図-17）。

また、ローリングについても掘削パターンにより概ね管理することができたが、貫通済エレメントと継手が嵌合していない地山側が下がりやすい傾向が認められた（図-18）。ローリングの進行が顕著となると、掘削パターンだけでローリングを抑制することが困難なエレメントも見受けられた。これは、先に施工したエレメントにローリングが生じていた場合、エレメント同士との嵌合により影響を受けたことが原因として推測される。これらのエレメントについては、発進架台の片側レールを10mm持ち上げるなどの措置を行った。

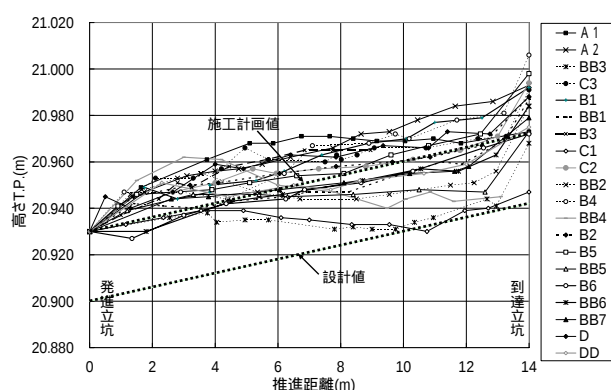


図-17 刃口高さの測量結果

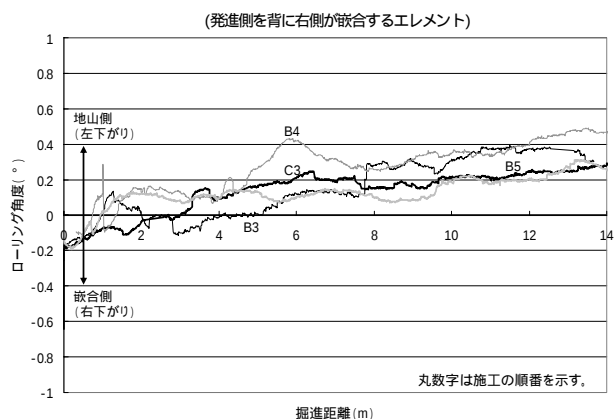
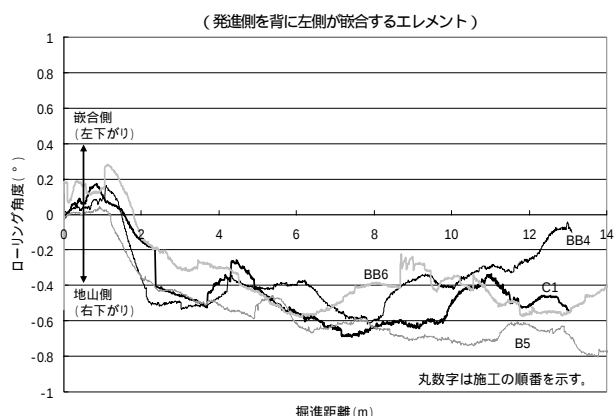


図-18 ローリングの発生状況

(3) 掘削パターンの適用実績

掘削パターンについては、計画では40mmすき取りを上限としていたが、上昇傾向を十分に抑制できない状況が認められたため、計画よりすき取り量を増やした掘削パターン（50mmすき取り）を追加設定して掘進した。掘削パターンの適用状況については、高崎方については、すき取り量の多い掘削パターン（30mm～50mmすき取り）を多く選択したのに対し、大宮方では大部分で0mmすき取りを選択している傾向が見受けらる。これは、高崎方については試験施工時（砂質土埋戻し）と現場（関東ローム）の土質条件の違いにより、テーパーが地山から受ける反力が試験施工時と比較して大きかったが、大宮方は含水比がやや高く地山がやや緩い状態であったため底面テーパーの効果が低減されたことが原因として考えられる（図-19）。

掘削パターン選択を150mm掘進する都度選択することについては、施工上管理が煩雑であったほか、効果を確認しづらい課題があった。実施工においては、刃口の上昇、下降傾向が顕著となった場合に掘削パターンを変更する事とした。今後は、掘削パターンを選択する間隔を1m程度に広げ、突き崩しやすき取り量が小さい掘削パターンを省略するなど、実施工を考慮した掘削パターンの運用計画を検討する必要があると考える。

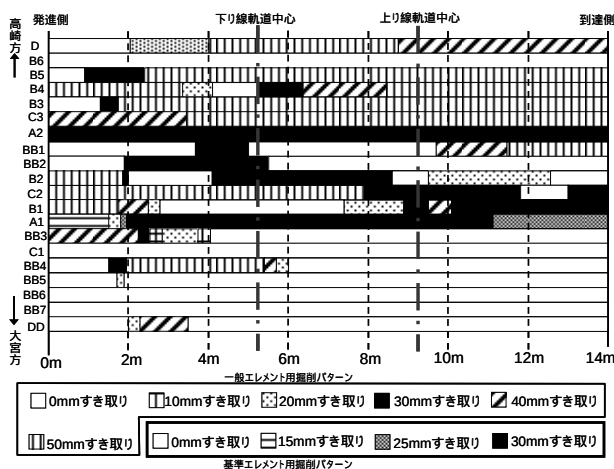


図-19 掘削パターンの適用結果

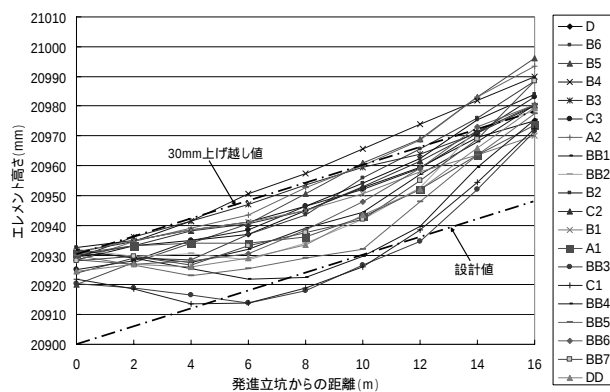


図-20 上床版エレメントの設置高さ

(4) エレメントの設置精度

けん引完了後に測量したエレメント設置高さの測量結果と比較すると、エレメントはほぼ一定勾配もしくはやや下に凸な状態で設置されており、概ね目標値での施工を達成することができた（図-20、図-21）。

(5) 軌道への影響

施工条件のステップ移行判断基準となる軌道変位測定においては、ステップ1及びステップ2の施工期間中、高低変位の進行量は最大で-4.4mmであった。軌道4項目全てにおいて警戒値に相当する軌道変位の進行は生じなかったことから、計画通りにステップを移行し、ステップ3にて昼夜施工を開始することができた。

上床版エレメント掘進期間中の軌道への影響については、刃口が軌道直下を通過中に大きな軌道変位は発生せず、また刃口通過後の軌道変位（高低）の後続沈下量は概ね4mm以下であった（図-22）。

管理値については、BB5エレメントの掘進期間中に上り線の同一測点で高低変位が警戒値を2回超過したが、掘進開始前から-高低変位4mmのあった箇所であり、軌道変位の進行は-8mmであったことから、施工管理上の問題はなかったものと判断される。

(6) 支障物の切削状況

上床版エレメント掘進中、玉石（直径100mm～200mm程度）、木製電柱下部、支線アンカー基礎（コンクリート製）と遭遇したが、いずれも軌道に影響を及ぼすこと



図-21 上床版エレメントの掘進完了状況

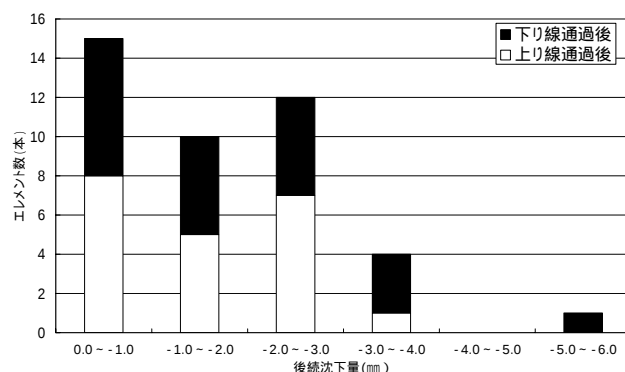


図-22 刃口通過後の後続沈下量

なく円滑に切断し刃口内部へ取り込むことができた（図-23）。切断時も、けん引力に目立った変化は認められなかった。

ただし、地盤切削ワイヤーが20エレメントのうち10エレメントで掘進の途中に破断する結果となった（図-24）。破断した地盤切削ワイヤーのダイヤモンドビーズに大きな磨耗は見受けられず、破断面から疲労によるものと推測される。これは、刃口内部の地盤切削ワイヤー取り回しのためワイヤーが小さい半径で何度も曲げられるため、回転中に局所的な応力が生じたものと考えられる。このため、駆動装置のプーリー径やワイヤー曲がり箇所への低減、材質等について引き続き検討する必要があると考える。なお、線路閉鎖作業でのワイヤー交換作業については、検討したサイクルタイムの時間内で完了することができた。

6. おわりに

今回、最小土被り2.0m未満の上床版エレメントの掘進に、

において、列車運行時間帯での施工を行った。その結果列車運行に支障するような軌道変位を発生させることなく、概ね目標値の精度で施工することができた。また、予定通りの工期で掘進を完了し、目標としていた工期短縮を実現することができた。本稿が今後の線路下横断構造物の施工において、地盤切削JES工法による工期短縮検討の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 高橋 保裕, 櫻井 照信, 齋藤 貴: 地盤切削 JES 工法で軌道下 80cm を掘削, トンネルと地下 42(11), pp.791-798, 2011.
- 2) 桑原 清, 有光 武, 高橋 保裕, 中井 寛: 地盤切削 JES 工法を用いた線路下横断工事, 地盤工学会誌 60(8), pp.10-13, 2012.
- 3) 小泉 秀之, 森山 智明, 桑原 清, 有光 武: 地盤切削 JES 工法 - 軌道変状を抑えた線路下横断工法 -, JR 東日本 SED No.33, pp.90-99
- 4) 高橋 保裕, 桑原 清, 齋藤 貴, 中村 征史, 森山 智明, 本田 諭, 地盤切削 JES 工法による施工について (打越 Bv), JR 東日本 SED No.36, pp.212-219
- 5) JR 東日本: 非開削工法設計施工マニュアル, 2009.

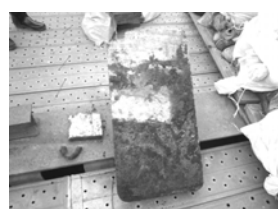
(2013.9.2受付)



玉石



玉石



支線アンカー基礎



木製電柱下部

図-23 支障物の切削状況

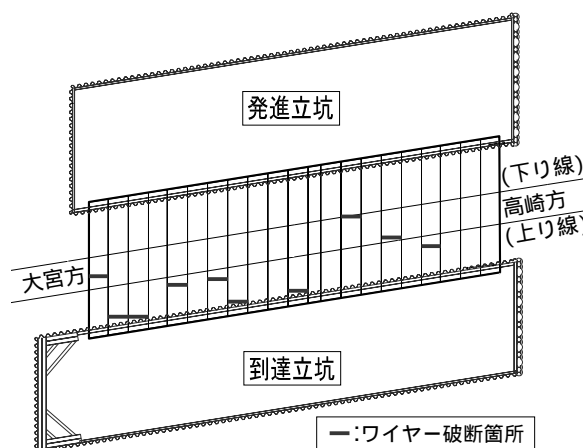


図-24 地盤切削ワイヤーの破断状況

Construction record on Ground-Cutting JES Method during train operation

Taisei NAKAYAMA, Yasuhiro TAKAHASHI, Takashi SAITO,
Satoshi HONDA and Satoshi OZEKI

The Ground-Cutting JES (Joint Element Structure) Method is a new excavation method. The JES method is a trenchless construction method used in underpass construction.

This is superior to original JES Method because the method can construct while 24 hours with little surface displacement under small overburden and many trains pass. This method has cutting wire at cutting edge front and excavates while cutting ground. We can excavate while trains are in service under small overburden and obstacles existence. We report the first GC JES Method use and the result of minor change for the underpass construction under a railway line.